

予防保全に向けた 橋梁の長寿命化修繕計画策定 に関する基礎資料について

藤村 知広¹・井上 謙¹

¹近畿地方整備局 近畿道路メンテナンスセンター 技術課 (〒573-0094 大阪府枚方市南中振3-2-3)

本報では、予防保全にむけた橋梁の長寿命化修繕計画として、健全度Ⅲ判定を着実に解消する従来のプロセスに加えて、重点化すべき健全度Ⅱ判定の戦略的な解消により、安全・安心の確保とコスト縮減効果の最大化を図った長寿命化修繕計画の基礎資料作成について報告する。過年度検討¹⁾²⁾から最新の点検結果や管理事務所とのヒアリングを通じて精度の向上を図った結果、健全度Ⅱ判定から健全度Ⅲ判定への進行を未然に防ぐサイクルを継続的に進めると経時的に健全度ⅠおよびⅡ判定橋梁の割合が増加し、長期的観点でのコストダウンが可能となる。

キーワード 戦略的修繕計画, 橋梁プロファイリング, 総合評価指標, 区間指標, 優先順位評価, A I

1. はじめに

平成26年度より橋長2m以上の道路橋については5年に1回の頻度で定期点検を実施することが義務付けられており、近畿地方整備局管内の管理橋梁数約4,900橋について、毎年1,000橋程度ずつ定期点検を実施している。

その定期点検結果を基に、各事務所にて修繕計画を策定しているところであるが、近畿地方整備局管内における修繕計画策定に関する現状として、早期措置段階である健全度Ⅲの橋梁については、各事務所において次回点検までに修繕が完了するよう、工事発注を実施してきた。

これに加え、予防保全段階である健全度Ⅱの橋梁の対策にも着手している状況であるが、健全度Ⅲのように次回点検までに修繕を完了するといった修繕ルールが明確でない。

本報では、予防保全にむけた橋梁の長寿命化修繕計画として、健全度Ⅲ判定を着実に解消する従来のプロセスに加えて、重点化すべき健全度Ⅱ判定の戦略的な解消により、安全・安心の確保とコスト縮減効果の最大化を図った長寿命化修繕計画の基礎資料作成について報告する。

2. 戦略的修繕計画のポイント

戦略的修繕計画のポイントは、「橋梁プロファイリング」と「区間指標を導入した優先順位評価」により健全度Ⅱ判定から健全度Ⅲ判定への進行を未然に防ぐものである¹⁾²⁾。

図-1に示すとおり、従来の修繕計画では健全度Ⅲ判定の解消のみが進められるため、健全度Ⅱから健全度Ⅲへ

の進行を食い止められず、健全度Ⅲ判定がいつまでも解消されない状態であった。本検討では、健全度Ⅱから健全度Ⅲになる橋梁の解消を「橋梁プロファイリング」と「区間指標を導入した優先順位評価」を用いて重点化することで、修繕費用が高価となる健全度Ⅲ判定が漸減し、トータルコストを縮減することが可能となる。

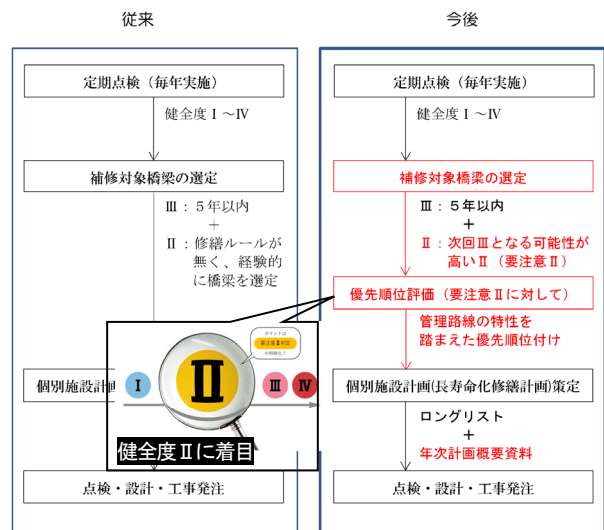


図-1 修繕計画の流れにおける従来と今後の違い

3. 橋梁プロファイリング

(1) 概要

健全度Ⅱの橋梁について、新都市社会技術融合創造研究会「橋梁補修施策プロファイリング手法の開発」³⁾の統計分析手法を活用し、橋梁全体の耐荷性能に影響を与

える損傷の分析を行い、修繕を重点化すべき損傷や部材の検討を行った。

平成26年度から平成30年度まで実施の定期点検を1巡目点検、令和元年度から実施の定期点検を2巡目点検として、橋梁定期点検結果をデータベースに蓄積し、ある損傷に対して、1巡目点検結果と2巡目点検結果の比較で部材間の劣化速度の違いを橋梁プロファイリング手法により分析した。その結果、図-2に示すとおり、劣化進行が早いグループ(要注意II)を抽出し、健全度IIの重点的な解消を目指す。

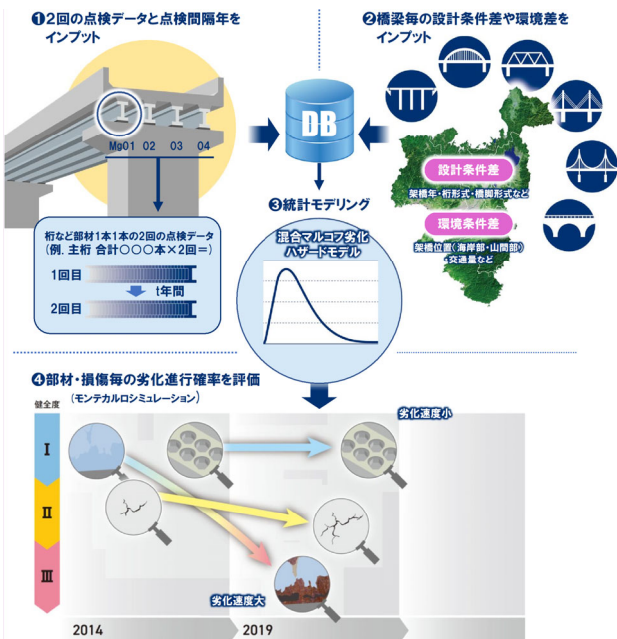


図-2 橋梁プロファイリングの流れ

(2) 優先順位決定手法

橋梁プロファイリングによる末端事象から頂上事象への統合イメージを図-3に示す。図-3は、末端事象から中位事象、頂上事象へプロファイリング結果を統合していく過程を示している。

- STEP1: 部材・損傷ごとに算出した健全度II→IIIとなる確率を算出
- STEP2: 同様に、全ての部材ごとに健全度II→IIIとなる確率を算出
- STEP3: 全部材で算出した健全度II→IIIとなる確率を算出し、橋梁全体でのリスク値と評価する。

このように橋梁プロファイリング手法を導入することで、複数回の定期点検結果から半自動的に橋梁全体で健全度IIから次回点検時に健全度IIIとなる確率を算出することが可能である。

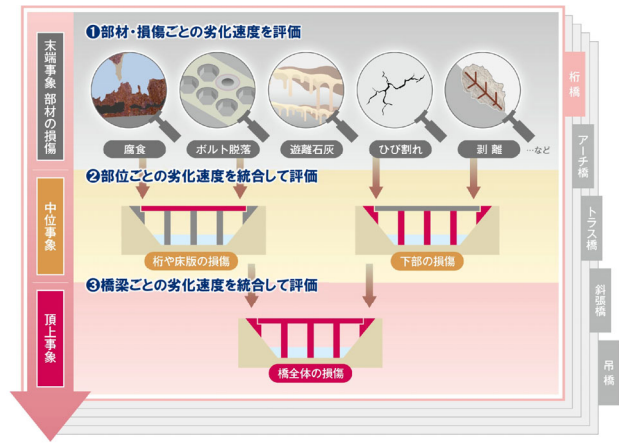


図-3 末端事象から頂上事象への統合イメージ

(3) 橋梁プロファイリングによる要注意II判定の抽出例

近畿地方整備局が管理する橋梁の定期点検データに橋梁プロファイリングを適用した事例を述べる。ここで、具体的な橋梁名は伏せていることに留意されたい。

近畿地方整備局管内の2巡目点検結果で健全度I、II判定の橋梁のうち、プロファイリング手法が適用可能となった約2,000橋を対象に確率(橋梁リスク)を算出した。表-1、表-2、表-3に、劣化速度:大・中・小の確率(橋梁リスク)の例示しているが、確率(橋梁リスク)の数値の大きいものから補修優先順位上位の橋梁の損傷例を示す。

表-1 補修優先順位上位の橋梁(劣化速度:大)

名称	建設年度	確率(橋梁リスク)
A橋	1974	0.0597
B橋	1975	0.0395
C橋	1961	0.0269
D橋	1974	0.0255
E橋	1974	0.0218



A橋の損傷例(劣化速度:大) C橋の損傷例(劣化速度:大)

図-4 劣化速度:大の損傷例

表-2 補修優先順位上位の橋梁(劣化速度:中)

名称	建設年度	確率(橋梁リスク)
F橋	1975	0.0203
G橋	1975	0.0046
H橋	1975	0.0043
I橋	1975	0.0035
J橋	1975	0.0034



F橋の損傷例(劣化速度:大) H橋の損傷例(劣化速度:大)

図-5 劣化速度:中の損傷例

表-3 補修優先順位上位の橋梁(劣化速度:小)

Table with 3 columns: Name (名称), Construction Year (建設年度), and Probability (確率(橋梁リスク)). Rows include K bridge (1934), L bridge (1975), M bridge (1964), N bridge (1973), and O bridge (1997).



M橋の損傷例(劣化速度:小) H橋の損傷例(劣化速度:小)

図-6 劣化速度:小の損傷例

(4) 橋梁プロファイリングによる補修優先順位のまとめ
補修優先順位の決定手法として、橋梁プロファイリング手法を導入することで、橋梁定期点検結果から半自動的に健全度Ⅱから次回点検時に健全度Ⅲとなる確率を算出することが可能である。その確率(橋梁リスク)を用いて、橋梁の補修優先順位付けを行った。

4. A I による健全度ⅡがⅢへ推移する橋梁予測

(1) 概要

橋梁プロファイリングによる分析を行えない橋梁については、A I (アソシエーション分析)を併用して健全度を判断する取り組みを実施している。アソシエーション分析とは「データベースに潜む最も興味深いルールを抽出する」ことを目的とした分析手法である。

具体的には、各橋梁の点検結果内の所見テキストから形態素解析でキーワードを自動抽出し、集積した結果から健全度を判断した(図-7)。

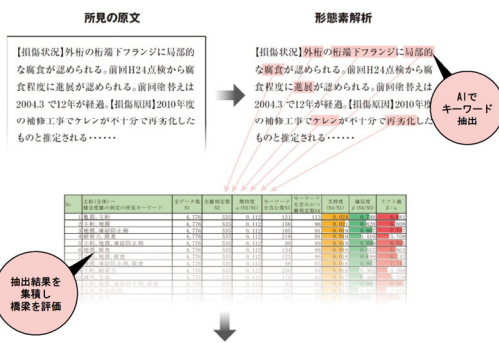


図-7 A I による分析概要

(2) 健全度Ⅲ判定要因の分析結果例

例えば、主桁端部に「腐食」が存在する場合、「凍結防止剤」を含んだ橋面水からの漏水と「地震」が同時に記載された所見において、健全度Ⅲ判定となることがAI分析から分かった(表-5)。正解率は87%と高くなる結果となった。

表-4 A I による評価指標結果(鋼主桁の例)

Table showing evaluation metrics for steel girders, including True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN) counts and rates.

表-5 A I による予測結果(鋼主桁の例)

Large table showing prediction results for steel girders, including bridge ID, deterioration rate, and predicted/actual status.

例えばNo. 33「地震、凍結防止剤、腐食」は、
与単語(組合せ)の出現頻度
内訳: 3つの単語を含むⅢが85件/全4,776件(主桁)=0.018

与単語(組合せ)の出現時にⅢ判定に結びつく可能性の高さ
内訳: 3つの単語を含むⅢが85件
3つの単語を含むⅢが85件

内訳: 確信度0.867/(全Ⅲ545件/全4,776件(主桁))=7.601

Support (A=B) = (Condition A) and (Conclusion B) in all data points / Total data points
Confidence (A=B) = (Condition A) and (Conclusion B) in all data points / (Condition A) in all data points
Lift (A=B) = Confidence (A=B) / (Conclusion B) in all data points

(主桁の腐食を例として)
主桁端部に「腐食」が存在する同時に、「凍結防止剤」を含んだ橋面水の漏水と「地震」する状況が同時に記載された所見において、必ずⅢ判定がなされることがAIによる分析結果から導かれた。
この結果は、橋梁維持管理に従事する技術者との判断とも合致しており、厳しい腐食環境下において急速な腐食が進展を懸念し、次回点検までに構造安全性の観点で措置が必要と判断したと推察される。

5. 区間指標を導入した優先順位評価

(1) 概要

橋梁単体の健全度だけでなく、前後区間にあるその他構造物の健全度やネットワーク機能などの状況も加味して、健全度Ⅱの橋梁の重点解消箇所を決定するために、管理路線の維持管理リスクに着目した優先順位を評価する総合評価指標⁴⁾を導入した。

ここで総合評価指標とは、道路施設に求められる3つの性能(①耐荷性能、②災害抵抗性能、③走行安全性)に着目した評価指標であり、定期点検データを用いて各評価指標を100点満点で数値化して、健全、要補修、要緊急対策の段階の判別ができる。

図-9に優先順位評価のイメージを示す。管理路線の維持管理リスクを I_R とする。

I_R の大小は対象構造物群の健全度 I_S と、路線のネットワーク機能の重みを I_N の合算値で評価する(式(1))。対象構造物群の健全度 I_S は対象構造物により構成され、橋梁、トンネル、防災施設群の3つの合算値とした(式(2))。また、路線のネットワーク機能の重み I_N は一般に区間の複数の属性(防災上の要因、交通特性、沿道特性等)により構成され、ここでは交通量、橋梁第三者被害可能性、DID地区、迂回路の合算値とした(式(3))。これらを1kmの区間で合算し、便宜上100を満点とし、数値が大きいほど健全と定義した(式(1))。この評価では、区間全体の健全度が低く、ネットワーク機能上のリスクが大きい区間は修繕優先度が高く評価される。

$$I_R = \frac{1}{2} \{ I_S + I_N \} \quad \dots(1)$$

$$I_S = I_{\text{橋梁}} + I_{\text{トンネル}} + I_{\text{防災点検}} \quad (\text{ただし、} 0 \leq I_S \leq 100) \quad \dots(2)$$

$$I_N = I_{\text{交通量}} + I_{\text{第三者被害}} + I_{\text{DID}} + I_{\text{迂回路}} \quad (\text{ただし、} 0 \leq I_N \leq 100) \quad \dots(3)$$

(2) 区間指標を導入した優先順位評価結果

前項で示した区間指標の検討過程を図化した。以下に、検討過程を示す。

- ステップ①：構造物ごとの健全性を算出した結果。代表として、橋梁の健全性評価結果
- ステップ②：橋梁、トンネル、防災施設の健全性評価を区間平均した結果
- ステップ③：路線のネットワーク機能指標(交通量、橋梁第三者被害可能性、DID地区、迂回路)の結果
- ステップ④：構造物の健全性と路線のネットワーク機能を合算した区間指標評価結果(図-10)

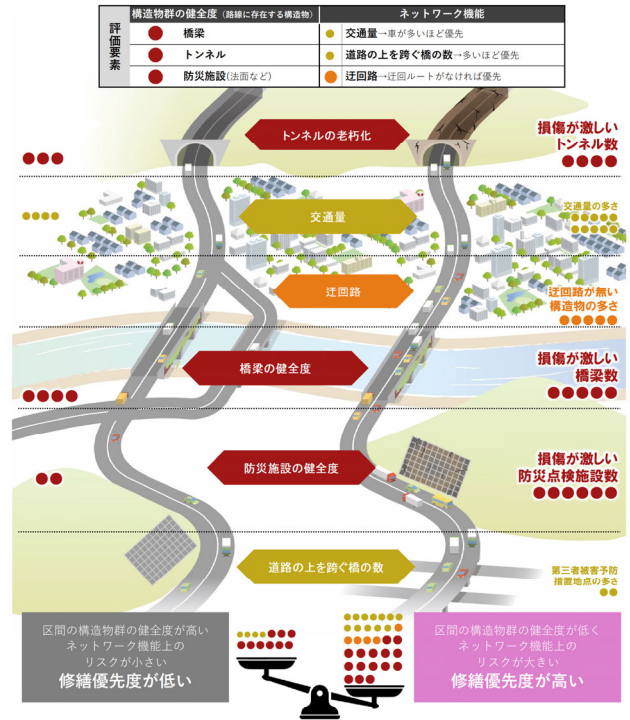


図-9 区間指標を導入した優先順位評価のイメージ

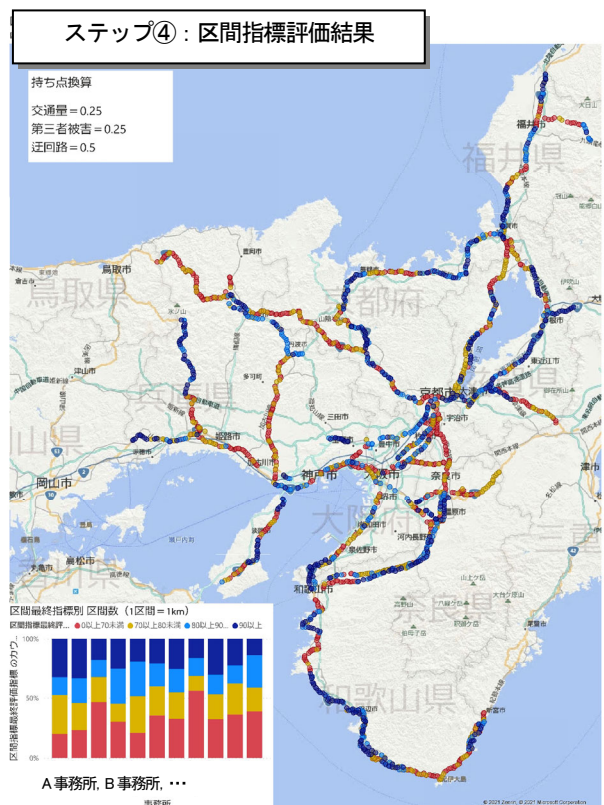


図-10 区間指標評価の結果

6. 修繕計画の最適化

(1) 概要

各橋梁の補修規模及び補修概算額を基とした補修路線及び優先順位を作成・更新した。実施にあたっては、道路管理事務所への意見聴取を元に、課題抽出及び運用実効性のある修繕計画の最適化を行った。

(2) 事務所連携による最適化

各事務所へのヒアリングを行い、修繕計画の最適化を行った。主なヒアリング結果とその対応を表-6に示す。

7. 橋梁修繕年次計画概要資料

「橋梁プロファイリング」を用いて橋梁定期点検結果から半自動的算出した橋梁の補修優先順位と、構造物群の健全度・ネットワーク機能特性を考慮した「区間指標」による補修優先順位を両方考慮することで、戦略的な健全度Ⅱの補修優先順位付けを行った。

また、他の橋梁と横並びで見ることができるよう、①橋梁諸元、②健全度・点検年、③プロファイリング結果、④区間指標算出結果、⑤カルテ点検年、⑥対策内容・事業費を記載した(表-7)。

表-6 事務所ヒアリング結果とその対応

設問		結果の総括	対応内容																																																	
現状のⅡ対策順序		<ul style="list-style-type: none"> 対策順序は決まっていない。 耐震補強工事と同時。 不調対策を主目的とした工事ロットの調整。ただし、Ⅲ判定橋梁に近い橋のみ。 Ⅱ判定単独では工事発注しない。 	Ⅱ対策の順序は特に決まっていないという現状を確認した。今後は、橋梁プロファイリング結果(劣化速度大:Ⅲ判定に以降しやすいⅡ判定橋梁)を今後情報提供する。																																																	
【区間指標】 構造物群の健全性	順位	「どれも同じ」が5事務所で最多。橋梁、トンネルは防災点検施設より優位に評価される傾向。	構造物群の健全性の重み:橋、トンネル、防災施設(自然斜面)の重要度は、いずれも第三者への影響がある点で「どれも同じ」が5事務所と最も多かったことを踏まえ、構造物群の健全性の重みは均等とする。																																																	
	意見	<ul style="list-style-type: none"> 「どれも同じ」 交通へ支障をきたす意味では同じ。「橋、トンネル」 点検が法制化されている。 点検結果が解釈しやすい。 																																																		
【区間指標】 ネットワーク機能	順位	<table border="1"> <thead> <tr> <th>順位</th> <th>第三者</th> <th>交通量</th> <th>迂回路</th> <th>DID</th> <th>合計</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1位</td> <td>7</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>13</td> <td>複数回答有り</td> </tr> <tr> <td>2位</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>1</td> <td>12</td> <td>複数回答有り</td> </tr> <tr> <td>3位</td> <td>0</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4位</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>5</td> <td>6</td> <td></td> </tr> <tr> <td>無回答</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>8</td> <td></td> </tr> <tr> <td>合計</td> <td>11</td> <td>11</td> <td>11</td> <td>11</td> <td>-</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	順位	第三者	交通量	迂回路	DID	合計	備考	1位	7	4	2	0	13	複数回答有り	2位	3	3	5	1	12	複数回答有り	3位	0	3	1	1	5		4位	0	1	0	5	6		無回答	1	0	3	4	8		合計	11	11	11	11	-		迂回路:重要な評価要素だが定義が曖昧とのご指摘があったため、重要物流道路および代替路・補完路を迂回路として、架橋地点の迂回率を算出し、迂回率1.5以上を「迂回路無」と再判定した。DID地区:評価指標から除外した。ネットワーク機能の重み:都市部と郊外部の評価要素の重みは均等とした。補足として、都市部では交通量大・橋梁第三者区間が多い傾向にあり、郊外部では迂回率が大きい傾向がある。
	順位	第三者	交通量	迂回路	DID	合計	備考																																													
1位	7	4	2	0	13	複数回答有り																																														
2位	3	3	5	1	12	複数回答有り																																														
3位	0	3	1	1	5																																															
4位	0	1	0	5	6																																															
無回答	1	0	3	4	8																																															
合計	11	11	11	11	-																																															
意見	<ul style="list-style-type: none"> 第三者被害有無が重視される傾向。 迂回路は、郊外の路線を有する福井、奈良、豊岡、和歌山では迂回路が上位だが、一方で、都市の路線が多い大阪、滋賀、姫路では下位。 交通量は、迂回路と逆の傾向。 DIDは重要視されない。 																																																			

表-7 橋梁修繕年次計画概要資料例

No.	カルテDB上の構健全度	カルテDB上の高検年度	ロングリスト上の構健全度	ロングリスト上の点検年度	プロファイリング結果		プロファイリング補充		修繕計画の最適化※1					区間指標最終(小保と優先)※2	(参考)Ⅱ対策年(平準化後)					
					橋梁リスク	優先対象	橋梁リスク	優先対象	橋梁【34】	トンネル【33】	防災【33】	構造物点数【100】	交通量【25】		第三者【25】	迂回路【50】	迂回路【50】	事業費(百万)※3	設計	工事
A橋	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.091650	劣化速度大			19	33	33	85	25	6	0	31	58.3	(1.60)	2022	2026
B橋	Ⅱ	2019	Ⅱ	2019	0.116560	劣化速度大			0	33	29	162	15	0	50	65	63.3	(7.74)	2022	2023
C橋	Ⅱ	2019	Ⅱ	2019	0.072935	劣化速度大			18	33	33	84	25	25	0	50	65			
D橋	Ⅱ				0.033180	劣化速度大			29	33	30	92	25	25	0	50	71			
E橋	Ⅱ				0.034389	劣化速度大			27	33	33	91	15	5	49	69	79.9	(7.02)	2022	2026
F橋	Ⅱ				0.0707	劣化速度大			7	33	33	93	15	11	90	76	83.4	(8.81)	2022	2026
G橋	Ⅱ				0.0327	劣化速度大			34	33	33	94	15	8	50	73	83.3	(9.50)	2022	2026
H橋	Ⅱ				0.0323	劣化速度大			19	21	33	93	25	6	50	31	82.8	(13.12)	2022	2026
I橋	Ⅱ				0.033571	劣化速度大	0.07623742	A1判定	23	33	33	89	15	0	50	65	78			
J橋	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.053260	劣化速度大			24	33	33	90	15	0	50	75	79			
K橋	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.032940	劣化速度大	0.075023742	A1判定	17	33	33	89	25	0	50	75	79			
L橋	Ⅱ	2018	Ⅱ	2014	0.034881	劣化速度大	0.019927536	A1判定	23	33	33	89	15	5	50	70	79.9	(7.02)	2022	2026
M橋	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.064634	劣化速度大	0.075023742	A1判定	25	33	33	91	15	5	49	69	79.9	(7.02)	2022	2026
N橋	Ⅱ	2019	Ⅱ	2019	0.112480	劣化速度大			14	33	24	71	15	25	50	90	80.4	(9.50)	2022	2026
...	Ⅱ	2019	Ⅱ	2019	0.092018	劣化速度大			18	33	33	84	25	6	50	31	82.8	(13.12)	2022	2026
...	Ⅱ	2019	Ⅱ	2019	0.024933	劣化速度大			18	33	33	84	25	6	50	31	82.8	(13.12)	2022	2026
...	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.072591	劣化速度大			25	33	33	91	15	11	90	76	83.4	(8.81)	2022	2026
...	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.059444	劣化速度大			29	33	33	94	15	8	50	73	83.3	(9.50)	2022	2026
...	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.059444	劣化速度大			29	33	33	93	25	13	50	88	90.1	(9.50)	2022	2026
...	Ⅱ	2019	Ⅱ	2019	0.031400	劣化速度大	0.075023742	A1判定	27	33	33	93	25	13	50	88	90.1	(9.50)	2022	2026
...	Ⅱ	2020	Ⅱ	2020	0.122800	劣化速度大			22	33	33	88	25	18	50	94	90.4	(9.50)	2022	2026

8. コスト縮減効果

事務所平均で71%、事務所毎にばらつきはあるが43～88%のコスト縮減効果が確認できる(表-8)。

一般的にはⅢ判定へ遷移した後は構造安全性の観点から部材取替や補強など大掛かりな修繕内容となる傾向があり工事費が膨らむ傾向がある。そのためⅡ判定を維持した段階で簡便な修繕を行う方が安全面、コスト面の両面で優位な傾向となる。一方、補修工事では仮設工費が占める割合が大きく、補修回数が大きいと逆に工事費を増大させる懸念があるため、劣化進展リスクがあるⅡ判定損傷に絞り込むなど、メリハリをつけた予防保全を行っていく必要がある。

表-8 予防保全効果(コスト縮減率)の算定結果

事務所名	劣化速度大		縮減率 (1-①/②)
	①Ⅱ	②Ⅱ⇒Ⅲ	
A事務所	135.07	1108.91	88%
B事務所	71.58	132	46%
C事務所	85.46	246.52	65%
D事務所	147.84	452.02	67%
E事務所	257.99	737.3	65%
F事務所	75.17	131.09	43%
G事務所	68.12	395.67	83%
H事務所	206.15	387.77	47%
I事務所	66.33	197.6	66%
J事務所	28.27	209.14	86%
K事務所	118.29	409.95	71%
合計	1260.27	4407.97	71%

9. まとめ

予防保全にむけた橋梁の長寿命化修繕計画として、健全度Ⅲ判定を着実に解消する従来のプロセスに加えて、重点化すべき健全度Ⅱ判定の戦略的な解消により、安全・安心の確保とコスト縮減効果の最大化を図った長寿命化修繕計画の基礎資料作成について報告した。

その結果、図-11に示すとおり、Ⅱ判定からⅢ判定への進行を未然に防ぐサイクルを継続的に進めると経時的にⅠおよびⅡ判定橋梁の割合が増し、安全・安心な暮らしの創出につながる。また、長期的観点でのコストダウンが可能となる。

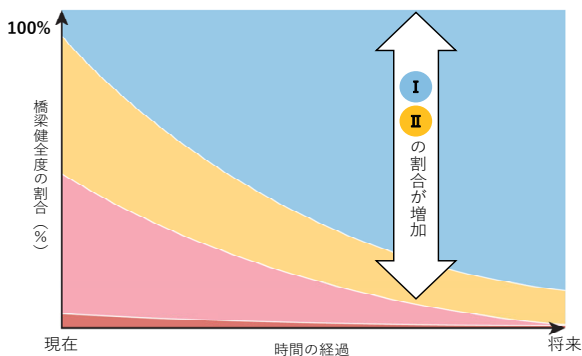


図-11 橋梁健全度と修繕費の経時変化イメージ

今後の主な検討課題を以下に示す。

- ・ プロファイリングでは様々な環境因子(点検データ上、観測不可能なものも含め)を1つの異質性パラメータに集約し考慮している。塩分量・かぶりといった観測可能な要因が異質性パラメータにどの程度影響しているのかについて現状は明らかでないため、分析の深化が必要である。
- ・ 橋単位の健全度Ⅲの橋梁における健全度Ⅱ部材もリスク値を算出するような分析対象の拡張が必要である。
- ・ 迂回路設定において、重要物流道路および代替路・補完路による迂回路評価の他に事務所・出張所目線での迂回条件を反映していくことが必要である。

今後、2巡目点検結果をさらに蓄積して分析することで「橋梁プロファイリング」「AⅠ分析」の精度向上を図るとともに、各事務所へのヒアリング等を継続することで実効性のある修繕計画策定のための検討を引き続き行う。

謝辞：本稿の執筆にあたっては、大阪大学 貝戸清之准教授の多大なるご協力をいただきました。この場をお借りして感謝いたします。

参考文献

- 1) 河合良治, 貝戸清之, 吉津宏夫: 近畿地方整備局における橋梁補修施策マネジメントの取り組み～橋梁補修施策プロファイリング手法の活用～, 第4回 JAAM 研究・実践発表会論文集, pp.1-6, 2020, https://www.jaam.or.jp/research_publication/2020/document_list_2020.html
- 2) 増田寛四郎, 貝戸清之, 光川直宏, 塚田祥久, 井川理智: 近畿地方整備局における橋梁長寿命化修繕計画の取り組み, 第5回 JAAM 研究・実践発表会論文集, pp.173-179, 2021, https://www.jaam.or.jp/research_publication/2021/document_list_2021.html
- 3) 大阪大学大学院 工学研究科 貝戸 清之: 橋梁補修施策プロファイリング手法の開発, 令和元年度新都市社会技術融合創造研究会報告書, 2020.3.
- 4) 玉越隆史, 大久保 雅憲, 横井 芳輝: 平成24年度道路構造物に関する基本データ集, 国土技術政策総合研究所資料第776号, 2014.1.